Rev.Acad.Canar.Cienc., VII (Núms. 2,3 y 4), 113-133 (1995)

EL DESCUBRIMIENTO DEL EFECTO ZEEMAN EN EL SOL Y EN EL LABORATORIO [1]

Jose Carlos del Toro Iniesta
Instituto de Astrofísica de Canarias
E-38200, La Laguna, Tenerife

"Further inquiry must also decide as to how far the strong magnetic forces existing according to some at the surface of the Sun may change its spectrum."
P. Zeeman, 1897[2]

Abstract

The origin of the discoveries, both on the Sun and in the laboratory, of the action of a magnetic field on spectral lines – the so-called Zeeman effect– is studied. The paper embraces the period from 1866, first date of which the author is aware of observed evidences about the widening of spectral lines in sunspots (as compared to those formed in the photosphere), until 1908, year in which the magnetic field in sunspots is definitely discovered. The interval between 1896-97 and 1908 is mainly dealt with from an astrophysical standpoint, although it is plenty of important contributions from laboratory experiments. The reason is two-fold: on the one hand, the significant role played by the Zeeman effect on the development of Quantum Mechanincs has suggested major historical studies that have already appeared in the literature and that are mainly concerned with laboratory –but not with astrophysical– spectroscopy; on the other hand, the understanding of the sizeable delay between the Zeeman's and Hale's discoveries (12 years) seems to be of concern after accounting for the fact that the findings by the first author were soon brought to the notice of the astrophysical community.

Resumen

En el presente trabajo se estudian los orígenes de los descubrimientos en el Sol y en el laboratorio del efecto que un campo magnético ejerce en la formación de las líneas espectrales, lo que se conoce como efecto Zeeman. El artículo abarca el periodo comprendido entre 1866, primera fecha de la que se tiene constancia de la observación de ensanchamiento de las líneas en las manchas solares por comparación al resto de la fotosfera, hasta 1908, año en que definitivamente se descubre el campo magnético en las manchas solares. La etapa comprendida entre 1896-97 y 1908, si bien está jalonada por innumerables aportaciones experimentales de laboratorio por parte de diferentes autores, se contempla aquí

---

[1]Conferencia impartida por el autor el 19 de enero de 1995 en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de La Laguna, dentro del ciclo *Historia y frontera en Matemáticas y Física (La amplitud del conocimiento)*.

[2]Del artículo original de Zeeman [55]. Citas textuales como ésta aparecen en el resto del artículo, pero traducidas al español por el autor, siempre en tipos de menor tamaño y con el texto entrecomillado. Allá donde se ha considerado necesario, se han introducido aclaraciones entre corchetes.

fundamentalmente desde el punto de vista de la Astrofísica por dos motivos principales: la importancia que el efecto Zeeman tuvo en el desarrollo de la Mecánica Cuántica ha sugerido importantes estudios históricos que han aparecido ya en la bibliografía y que tienen que ver con espectroscopía de laboratorio –pero no, con espectroscopía astrofísica–; por otro lado, parece importante comprender el considerable retraso existente entre el descubrimiento de Zeeman y el de Hale (12 años), teniendo en cuenta que el hallazgo del primero era suficientemente conocido por la comunidad astrofísica.

1. Introducción

El ensanchamiento y/o desdoblamiento en componentes, con estado de polarización bien definido, de líneas espectrales en presencia de campos magnéticos intensos, es lo que hoy conocemos como *efecto Zeeman*. Su descubrimiento en 1896 supuso, sin duda, un acontecimiento de singular trascendencia en el desarrollo de la Mecánica Cuántica y, por tanto, de toda la física moderna. Este es un hecho harto conocido. Valga como muestra de lo cual la práctica omnipresencia en cualquier libro de texto actual de Física Cuántica de algún apartado dedicado a este fenómeno físico. Existen excelentes estudios históricos (véase, por ejemplo, E. Whittaker [50] o el trabajo más detallado de M. Jammer [23]) en los que se refleja claramente cómo el efecto Zeeman fue una de las piedras de toque experimentales que precisaban una explicación teórica hasta tan tarde como ¡30 años después de su descubrimiento!. Para ilustrar la situación, baste aquí comentar que los hechos experimentales relativos al efecto Zeeman fueron esgrimidos en 1926 por R. de L. Kronig [28], basándose en una sugerencia previa de W. Pauli [40], como argumento en contra de la hipótesis del spin del electrón, formulada por G.E. Uhlenbeck y S. Goudsmit [49] en 1925. Podemos afirmar, entonces, que el efecto Zeeman planteó un reto de excepcional importancia para la física teórica, hasta la propia formulación mecano cuántica de una teoría consistente del electrón, en sus dos vertientes. la no relativista de Pauli [41, 1927] y la relativista de P.A.M. Dirac [9, 1928]. Sólamente tras esta teoría llegó a poderse justificar la regla semiempírica del desdoblamiento obtenida previamente por A. Landé [29, 30] (cf. Jammer [23, p. 126-130]) y, por tanto, la naturaleza física del fenómeno.

Lo que no es tan conocido en general es la influencia del efecto Zeeman en la Astrofísica y, más en particular, en la Física Solar, como herramienta fundamental para la determinación de campos magnéticos. Desde el descubrimiento en 1908 por G.E. Hale [17] de la existencia de intensos campos magnéticos en las manchas solares hasta nuestros días. el análisis espectroscópico o espectropolarimétrico (espectroscopía más análisis de polarización) de líneas ensanchadas por la acción de campos magnéticos es habitual para la inferencia de éstos en diversas estructuras solares, así como en otras estrellas. Lo que

aún es menos conocido, incluso en el seno del ámbito astrofísico, es el hecho de que se tiene noticia de la observación del fenómeno en el Sol desde 1866, ¡30 años antes de su descubrimiento en el laboratorio!. La cita que aparece reproducida textualmente en el comienzo del presente artículo resulta, pues, cuando menos paradójica en dos sentidos. Por una parte, P. Zeeman *sugiere*, sin al parecer tener constancia de las observaciones solares previas, el posible uso del fenómeno que acababa de descubrir para encontrar campos magnéticos en el Sol. Por otra parte, entre el descubrimiento de Zeeman y el de Hale median 12 años, tiempo más que suficiente para que la citada sugerencia hubiera suscitado interés con anterioridad en la comunidad astrofísica, sobre todo, habida cuenta de que el propio Hale era editor de *The Astrophysical Journal* [3], revista en la cual el artículo original de Zeeman había sido reproducido íntegramente.

El presente artículo pretende encontrar soluciones a las dos paradojas históricas mencionadas investigando los orígenes de los descubrimientos en el laboratorio y en el Sol del efecto Zeeman. Además, en el artículo se discuten aspectos circunstanciales como el hecho de que descubrimientos de singular relevancia, como los estudiados aquí, no sólo vienen marcados por la especial valía intelectual de sus autores, sino que también se encuentran acompañados de elementos que pueden considerarse fortuitos e, incluso, de errores previos de los propios autores.

2. Antecedentes de un descubrimiento

En 1845, M. Faraday [10] descubre la rotación del plano de polarización de la luz al atravesar un medio diamagnético transparente. Este hecho fue, sin duda, el disparador de su intuición acerca de la relación entre la luz y los fenómenos magnéticos y lo que le llevó a dedicar sus últimos esfuerzos investigadores, en 1862, a la búsqueda de posibles efectos que un campo magnético pudiera ejercer sobre el espectro, utilizando sales de distintos elementos como sodio, litio, estroncio o bario [24]. Su sagacidad no se vió, sin embargo, compensada (como en tantas otras ocasiones) y obtuvo repetidamente resultados negativos. Desafortunadamente, falleció cinco años más tarde sin conocer lo acertado de su intuición.

Un año después de que Faraday realizara su descubrimiento en la Royal Institution de Londres, un joven estudiante, reciente y brillantemente graduado en la Universidad de Cambridge, W. Thomson (Lord Kelvin) [48], propone una analogía mecánica a los fenómenos electromagnéticos. En ella se sugiere

[3]El subtítulo de esta revista, fundada por G.E. Hale en 1895, *An International Review of Spectroscopy and Astronomical Physics* es una excelente muestra de cómo la espectroscopía de laboratorio y la astronómica eran un continuo referente recíproco durante la práctica totalidad del siglo XIX.

la vibración/rotación del "medio lumínífero" (sic), esto es, en lenguaje de hoy en día, de los componentes microscópicos de la materia emisora de radiación electromagnética[4]. Esta analogía mecánica que, como es bien sabido (cf., e.ǵ., Whittaker [50], p. 242-243), resultó inspiradora de la posterior teoría electromagnética de J.C. Maxwell, supuso la "espoleta" intuitiva, como comprobaremos más tarde, para que Zeeman, al igual que uno de sus precursores, P.G. Tait, comenzara los trabajos experimentales dirigidos a la búsqueda de la influencia de un campo magnético en el espectro de la luz emitida por una substancia.

En 1860 puede cifrarse la culminación de los esfuerzos de no pocos (e ilustres) físicos quienes, desde los albores del siglo XIX habían ido progresando en la comprensión cuantitativa del espectro luminoso de diversas substancias y, en particular, de las líneas que éste presentaba en emisión o absorción. Esto es así porque ese año aparecen publicados sendos, e independientes, trabajos del físico prusiano G. Kirchoff [25] y del escocés B. Stewart [45] estableciendo la equivalencia entre la capacidad absorbente y emisora de radiación de cualquier substancia (hoy sabemos que el medio debe encontrarse *en equilibrio termodinámico* para que se verifique tal equivalencia; esto es, debe ser un *cuerpo negro*). Estos trabajos resultan de singular importancia por dos motivos: primero, porque condujeron a la comprensión definitiva de la equivalencia entre las líneas emitidas y absorbidas por una determinada substancia (hoy diríamos *elemento químico*) y que la caracterizan –a ella y no a otra–. Segundo, porque sugirieron al propio Kirchoff y a su compañero de Heidelberg, R. Bunsen [26], que las líneas de Fraunhofer ([14], 1817), observadas en absorción en el espectro solar, podrían servir como identificación de la presencia de diversas substancias en las capas externas del Sol. Tal sugerencia fue utilizada por Kirchoff durante los años siguientes en sus investigaciones del espectro solar, trabajo cuyo principal fruto fue la identificación de no pocos elementos químicos constituyentes de la atmósfera del Sol[5]. Parece no caber duda, pues, que los trabajos de Kirchoff pueden considerarse como el hito que marca el nacimiento de la Astrofísica moderna: con él se fundamenta el hecho de que las mismas leyes de la Espectroscopía que operan en el laboratorio son aplicables a los objetos celestes.

---

[4]El electrón no fue descubierto hasta 1897 por J.J. Thomson [47].

[5]El lector interesado en detalles, puede encontrar excelentes discusiones acerca tanto de los antecedentes, como de las repercusiones inmediatas en la comunidad científica, en los libros de Hearnshaw ([22], p. 40-50) y Whittaker ([50], p. 367-372).

2.1. Observaciones solares

Cuatro años más tarde de los intentos fallidos de Faraday y, por tanto, seis más tarde del trabajo de Kirchoff, en 1866, Sir J.N. Lockyer[6] comunica a la Royal Society [31] sus observaciones del espectro de una mancha solar. En dicha comunicación refiere:

> "Todas las bandas [líneas] de absorción, ..., visibles en el espectro de la fotosfera, ..., eran visibles en el espectro de la mancha; ellas [las líneas], además, se mostraban más anchas cuando cruzaban el espectro de la mancha [en relación a las fotosféricas]."

No fue el hecho diferencial, esto es, el ensanchamiento relativo de las líneas, lo que llamó la atención de Lockyer sino, por el contrario, la coincidencia de las líneas en el espectro de la fotosfera y en el de la mancha. En efecto, la motivación del astrónomo para emprender tales observaciones había sido dilucidar entre las dos teorías más recientes de la época acerca de la naturaleza oscura de las manchas[7]. Una de tales teorías había sido defendida por él mismo y por otros, y los resultados le parecían refutar las hipótesis de la contraria. No es objeto del presente trabajo discutir acerca de ambas teorías y, ni siquiera, de las conclusiones de Lockyer que, sin duda, con los conocimientos actuales, podrían ser puestas en tela de juicio, sino, por el contrario, resaltar que la búsqueda de soluciones de un problema de mayor envergadura –por su, evidente, mayor notoriedad observable–, la condición de estructuras oscuras de las manchas, impidió a su autor percartarse de la importancia potencial del ensanchamiento de las líneas en la mancha[8]. Nos encontramos, pues, ante la primera observación en la naturaleza de lo que, hoy en día, sabemos puede ser atribuido al efecto de un intenso campo magnético en la formación de las líneas espectrales: el desdoblamiento de las líneas, observado con un espectroscopio (las observaciones eran visuales) de pequeño poder resolutivo, se traduce, necesariamente, en un ensanchamiento de las mismas.

Evidentemente, observaciones posteriores fueron confirmando el ensanchamiento y/o apariencia más difusa (de nuevo en observaciones visuales) de las líneas espectrales formadas en manchas, hasta resultar un fenómeno común-

---

[6] Lockyer fue uno de los físicos solares más influyentes de finales del siglo XIX y comienzos del XX. Entre sus múltiples aportaciones a la Astrofísica se cuenta la identificación de la línea D_3 como de un elemento hasta entonces desconocido, cuyo nombre acuñó: el helio. Fue fundador de la revista *Nature*.

[7] La primera de tales teorías –defendida, según Lockyer, por Faye– suponía el interior del Sol como una "masa de gas nebulosa" de débil poder radiativo y la fotosfera, de mayor poder radiativo, pero a menor temperatura. En la mancha se podía ver el interior a través de una "abertura" de la fotosfera; se veía más oscura debido al menor poder radiativo. En la segunda –sostenida, según Lockyer, por De La Rue, Stewart, Loewy y por él mismo–, la oscuridad de las manchas se debía a los efectos "refrigerantes y absorbentes" de una corriente descendiente de "la atmósfera del Sol", la cual "se sabe más fría que la fotosfera".

[8] El mismo Lockyer, dado que las condiciones observacionales no habían sido las óptimas a su juicio, reconoce no haber podido comprobar si el ensanchamiento era real o tan solo aparente.

mente aceptado. En 1883, Young, catedrático de Astronomía en el College de New Jersey, muestra en su libro titulado *El Sol* ([53], p. 130) lo que, hasta donde alcanza el conocimiento del autor del presente artículo, puede considerarse la primera ilustración gráfica jamás publicada del desdoblamiento de líneas espectrales en presencia de campo magnético. En la figura 82 de dicho libro presenta un dibujo de su observación, de septiembre de 1870, del doblete D del sodio en el que claramente se observa cómo ambas líneas se separan en dos al cruzar una mancha solar. En el artículo del jesuita A. Cortie [5], del Observatorio de Stonyhurst (Inglaterra), en 1886, aparece igualmente una mención clara del fenómeno. Entre los tres tipos de líneas en que clasifica las observadas en el espectro de las manchas, el primero es el formado por aquéllas que presentan

> "un cierto aspecto difuso alrededor de porciones ensanchadas de las líneas oscuras [en absorción]".

En el mismo artículo informa del desdoblamiento de las líneas D del sodio[9]:

> "en varias ocasiones ... estas dos líneas no estaban sólamente ensanchadas y difusas, sino que también *invertidas* en una porción de su longitud."

Existe igualmente constancia (cf. Mitchell [36]) de que las observaciones fotográficas de 1892 de los catedráticos Young y Reed del Observatorio de Princeton, contienen numerosos ejemplos de líneas *invertidas*[10].

A comienzos de la década de los 90, pues, era ya ampliamente conocido el desdoblamiento de gran número de líneas en las manchas, pero el interés que por ello suscita entre los astrónomos no parece mayor que el taxonómico. Quizá sea ésta la razón por la que las observaciones solares no trascienden a la comunidad espectroscópica en general. Los físicos solares se encontraban más preocupados por entender propiedades de las manchas que, como la temperatura, parecían más comprensibles desde un punto de vista astronómico. Como ejemplo podemos citar a Young [52] quien en 1872 propone, en base a la observación de líneas propias de las manchas –no presentes en el espectro de la fotosfera–, que la temperatura de aquéllas es sensiblemente inferior a la de ésta. La presencia de estas líneas espectrales propias a las manchas suscitó,

---

[9]El doblete D del sodio aparece repetidamente no sólo en este artículo sino a lo largo de toda la historia de la Espectroscopía. La razón es clara: únicamente se precisa sal común para producir este par de intensas líneas amarillas; por otra parte, de entre los elementos fácilmente disponibles, los alcalinos tienen sus líneas de resonancia –las líneas D lo son– en el visible. La letra D corresponde a la nomenclatura original de Fraunhofer [14] y se encuentran a las longitudes de onda de 5895.923 (D_1) y 5889.953 Å (D_2) –el orden establecido comenzaba en la parte roja del espectro–. Todas las longitudes de onda de líneas espectrales que se citan a lo largo del presente artículo han sido tomadas del trabajo de C.E. Moore [39]

[10]La "inversión" corresponde a la observación, bien visual, bien en la placa fotográfica, de una línea en absorción en cuyo interior aparece una zona menos oscura (o más brillante), esto es, un desdoblamiento.

sin duda, gran interés y aparece recurrentemente en la mayor parte de los trabajos espectroscópicos de la época.

2.2. Observaciones de laboratorio

En 1875, P.G. Tait, catedrático de la Universidad de Edimburgo y amigo personal de Lord Kelvin, influido por las analogías mecánicas de éste último[11] y por los resultados de Faraday acerca de la rotación del plano de polarización de la luz que comentábamos al comienzo de esta sección, intuye teóricamente el desdoblamiento de una línea espectral bajo la acción del campo magnético. En su comunicación a la Royal Society de Edimburgo [46], titulada *Sobre la posible influencia del magnetismo en la absorción de la luz y algunos temas relacionados*, escribe textualmente

> "... y por tanto, lo que originalmente era una simple línea de absorción podría convertirse en una línea doble ...".

Sin embargo, su intuición, siendo bastante más precisa que la de Faraday 13 años antes, obtuvo la misma recompensa que la de éste: el resultado de sus experimentos de laboratorio fueron repetidamente fallidos.

En 1885 y 1886, Ch. Fievez, reputado astrónomo belga, publica sendos trabajos [11, 12] en los que explica sus resultados en el laboratorio acerca de la influencia del campo magnético sobre las líneas. En este caso, los resultados son positivos, pero la explicación es inexistente. En efecto, Fievez informa en el primero de los artículos (titulado *Sobre la influencia del magnetismo en las características de las líneas espectrales*) cómo tras la aplicación de un campo magnético –y sólo durante la misma–, las líneas D del sodio (y algunas de otros elementos) no sólo se ensanchan sino que se *invierten* una y hasta dos veces. Desafortunadamente, concluye que los fenómenos observados por la acción del campo magnético son cualitativamente iguales a los producidos por un aumento de temperatura. En el segundo de los trabajos, sin embargo, informa que no había sido capaz de encontrar el mismo efecto con líneas en absorción. Seguramente estos dos hechos le hicieron no proseguir en sus investigaciones. Ello también llevó consigo la ausencia de trascendencia internacional de los experimentos. Parece bastante claro, no obstante, que Fievez observó por primera vez en el laboratorio lo que hoy conocemos como efecto Zeeman.

3. El descubrimiento en el laboratorio

Tras lo expuesto en §2 parece evidente que el efecto Zeeman podría ostentar el nombre de algún otro científico. El fenómeno había venido siendo buscado

[11] Él mismo lo reconoce en su artículo.

e incluso observado durante más de cincuenta años. Sin embargo, búsqueda y encuentro no concurrían ni en las mismas personas ni en el mismo ámbito (solar o de laboratorio). Tal concurrencia no se produjo hasta 1896 en la persona de un joven investigador de 30 años, P. Zeeman, a la sazón profesor asociado de la Universidad de Leiden (Holanda). Como él mismo admite, algunos años antes, durante el transcurso de sus investigaciones acerca del efecto Kerr, se le ocurrió plantearse cómo se verían afectadas las líneas espectrales emitidas por una substancia en presencia de un campo magnético. La fuente a la que acudir para intentar intuir el posible resultado era, evidentemente, la misma que inspiró a Tait: la analogía mecánica de Lord Kelvin.

> "El razonamiento ... que me indujo a buscar alguna influencia del magnetismo fue, al principio, el siguiente: Si es cierta la hipótesis de que en un campo magnético tiene lugar un movimiento rotatorio del éter, con el eje de rotación en la dirección de las fuerzas magnéticas (Kelvin y Maxwell), y si la radiación de la luz se puede imaginar originada por el movimiento de los átomos relativo al centro de masas de la molécula, rotando en toda clase de órbitas, supongamos por simplicidad, círculos, entonces, el periodo, ..., vendrá determinado por las fuerzas que actúan entre los átomos y, por tanto, las desviaciones del periodo a ambos lados ocurrirán por la influencia de las fuerzas perturbadoras entre el éter y los átomos. El signo de la desviación, por supuesto, vendrá determinado por la dirección del movimiento, tal y como es visto a lo largo de las líneas de fuerza."[12]

Según sus propias palabras, Zeeman no tenía conocimiento de ninguno de los trabajos mencionados en la sección anterior, de modo que tuvo que partir de cero. Éstos resultaron desalentadoramente fallidos: nada apreciable sucedía a las líneas cuando el electroimán se ponía en funcionamiento. Él mismo reconoce que no habría retomado los experimentos de no haber sido por una circunstancia fortuita. Leyendo las obras completas de Maxwell, encuentra un comentario de éste sobre los últimos esfuerzos experimentales de Faraday, que describimos en §2. Este hecho resultó un acicate para su prurito científico:

> "Si un Faraday pensó en la posibilidad de la relación anteriormente citada [cambios en el espectro debidos al magnetismo], quizá podría aún merecer la pena intentar el experimento de nuevo con los excelentes medios de espectroscopía actuales, ya que no tengo constancia de que haya sido hecho por otros."[13]

Así pues, repitió más cuidadosamente el montaje experimental y, esta vez, los resultados positivos no se hicieron esperar. Las líneas del doblete D del sodio aparecían notablemente ensanchadas cada vez que el electroimán era puesto en funcionamiento. Tales resultados fueron comunicados a la Koninklijke

---

[12]Del artículo original de Zeeman [55].

[13]Del artículo original de Zeeman [55]. La apostilla "... no tengo constancia de que haya sido hecho por otros." está sin duda motivada por la necesidad de Zeeman por reclamar para sí la autoría y originalidad del descubrimiento, como discutiremos un poco más tarde en esta misma sección.

Akademie van Wetenschappen (Real Academia de Ciencias) de Amsterdam [54].

El año siguiente, 1897, Zeeman publica un artículo más completo en *Philosophical Magazine*[14] [55], titulado *Sobre la influencia del magnetismo en la naturaleza de la luz emitida por una substancia*, en el que describe con todo lujo de detalles todos y cada uno de los pasos experimentales que le permitieron confirmar que el fenómeno se debía ciertamente a la acción del campo magnético y no a cualquier otro efecto espurio. Este trabajo es, sin duda, un modelo recomendable para cualquier estudiante de Física experimental. El artículo no se queda ahí, sin embargo, sino que ofrece una explicación física del fenómeno observado. Haber sido estudiante de H.A. Lorentz, y tenerlo como catedrático en aquellos momentos en su universidad, fue decisivo para poder comprender el efecto. Pronto se apercibió de que la reciente teoría del electrón de Lorentz [32] podría dar cuenta de los experimentos. Comunicada su intuición al propio Lorentz, éste le explicó detalles de la teoría tales como que, bajo la acción del campo magnético y observando en la dirección de las líneas de fuerza, la línea espectral se vería desdoblada en dos componentes, *circularmente polarizadas en sentidos opuestos*, y cuya separación respecto a la posición original de la línea era proporcional a la intensidad del campo magnético y a la relación carga-masa (e/m) del electrón; en caso de observación en cualquier otra dirección, la línea se vería descompuesta en un triplete, una de cuyas componentes, la central, ocuparía la posición original de la línea; si la línea de visión era perpendicular a la dirección del campo, las tres componentes estarían *linealmente polarizadas*. El desdoblamiento, pues, correspondía al ensanchamiento observado; la prueba definitiva de la validez de la teoría pasaba, por tanto, por verificar las propiedades de polarización del espectro. Con la ayuda de una lámina retardadora de cuarto de onda y un prisma de Nicol fue capaz de comprobar distintos estados de polarización en ambas alas de las líneas ensanchadas. Además, su medida del ensanchamiento de las líneas le permitió estimar la relación carga-masa del electrón, obteniendo un valor en excelente acuerdo al que determinaría ese mismo año J.J. Thomson[15] en su descubrimiento del electrón en la deflexión de rayos catódicos por la acción de un campo magnético[16]. Así mismo, aten-

---

[14] El artículo fue reproducido íntegramente ese mismo año en *The Astrophysical Journal* [56].

[15] En el número siguiente de la misma revista, *Philosophical Magazine* [47].

[16] El valor obtenido por ambos fue, más bien, una estimación de orden de magnitud. Ni uno ni otro pretendían obtener valores muy precisos, conscientes de los márgenes de error que tenían. Ambos encuentran $e/m \simeq 10^7$ en unidades electromagnéticas CGS. El valor actual, en las mismas unidades es de $1.76 \cdot 10^7$. De todas formas, aunque lo hubiera pretendido, Zeeman no habría podido determinar el valor correcto, puesto que el factor de Landé efectivo –desconocido en aquellos momentos, evidentemente– de las líneas D del sodio es 1.333 (D_1) y 1.167 (D_2).

diendo al carácter dextrógiro de la componente de menor longitud de onda, concluyó que el electrón debía tener una ¡carga positiva![17]

A pesar de lo reducido del ámbito de la comunicación de 1896, el eco internacional debió ser enorme si atendemos al hecho de que ya en el artículo de 1897 el propio Zeeman se hace eco, en un apéndice, de sendas cartas informándole de los trabajos de Tait y Fievez, referidos en §2.2. La primera fue dirigida por Tait a Zeeman y éste, en su comentario, reconoce que la idea intuitiva de Tait, siendo básicamente idéntica a la suya, era incapaz de explicar la observación en el caso en que la línea de visión fuera perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético. La segunda, fue dirigida por un tal van Aubel (Fievez había fallecido) a H.K. Onnes[18] (director del laboratorio donde trabajaba Zeeman), para su comunicación a la Academia. Los comentarios acerca de los trabajos de Fievez son un poco más extensos y concluye que lo observado por este autor no tenía por qué coincidir con sus experimentos, esto es, que el desdoblamiento podría haber sido causado por otro agente distinto al propio campo magnético. A esta conclusión ayudó el hecho de que el propio Fievez no se mostraba seguro en su artículo de la causa de los fenómenos observados y ni siquiera había buscado ningún tipo de explicación. En lo que es una clara reafirmación de su autoría del descubrimiento, al final del apéndice escribe:

> "Si hubiera tenido conocimiento de los experimentos de Fievez, ellos habrían sido para mí un incentivo para investigarlos más aún, puesto que Fievez no prosiguió su búsqueda hasta un resultado definitivo. Por el momento, permanece al menos dudoso si el fenómeno observado por Fievez con una llama magnetizada puede ser realmente atribuido a la *acción específica del campo magnético en el periodo de las vibraciones de la luz*, lo cual yo he encontrado e indudablemente demostrado a través de la confirmación experimental de las predicciones de Lorentz."

La trascendencia del descubrimiento de Zeeman fue formidable como comentábamos en §1 y supuso para su autor y para Lorentz el Premio Nobel de Física de 1905. Hacia el otoño de 1897, tras el descubrimiento de Thomson del electrón [47], en el que se obtenía el signo negativo del electrón y con la correcta interpretación del mismo en el efecto Zeeman, por parte de C.G.W. König [27] y A. Cornu [3], teoría y experimentación encajaban perfectamente. No obstante, sin que suponga un demérito para la brillantez del trabajo de Zeeman, no podemos calificar sino de afortunadas algunas de las circunstancias que concurrieron en el mismo. Por un lado, su desconocimiento previo

---

[17] Los errores de signos en polarización son comunes incluso en nuestros días.

[18] Onnes fue el descubridor de la superconductividad y que recibió el Premio Nobel de Física en 1913 por sus trabajos en física de bajas temperaturas y por la liquefacción del helio. Como nota curiosa, citaremos que el anuncio de la liquefacción del helio apareció en *Nature* (1908) inmediatamente después del artículo que el propio Zeeman escribió en dicha revista, comentando el descubrimiento de Hale (ver §5).

del trabajo de Fievez no le condujo a utilizar un electroimán capaz de producir campos magnéticos más intensos. En efecto, si lo hubiera hecho, la conciliación con las predicciones teóricas de Lorentz habría sido imposible. Las líneas del doblete D del sodio se habrían desdoblado en lo que son: un cuadruplete (D_1) y un sextuplete (D_2), lo cual, evidentemente, no concuerda con los tripletes previstos por Lorentz. Ello, no cabe duda, habría confundido a Zeeman y cuando menos habría retrasado el curso de los acontecimientos. En segundo lugar, su desconocimiento de las observaciones solares que hemos detallado en §2.1 impidió que, en vez de la sugerencia que transcribimos al comienzo del presente trabajo, él mismo hubiera podido constatar que el fenómeno que acababa de descubrir se produce de forma natural en nuestra estrella, con lo cual el acuerdo entre teoría y experimentos habría resultado aún más espectacular.

4. El intervalo entre dos descubrimientos

No es objetivo del presente artículo glosar los sucesivos avances que en el laboratorio se fueron produciendo y que, por otro lado, hemos resumido en la introducción. Queremos aquí hacer más énfasis en las observaciones solares que condujeron al descubrimiento de campos magnéticos en la superficie del Sol. Resultaría, sin embargo, poco menos que imperdonable no citar que el acuerdo entre teoría y experimentación del que nos hacíamos eco en la sección anterior duró en realidad muy poco; apenas unas semanas. Antes de acabar 1897 aparecen sendos trabajos de A.A. Michelson [34] y T. Preston [42] que arrojan serias dudas sobre la teoría del triplete de Lorentz. El primero de los autores, utilizando el interferómetro de su invención, encuentra distintas líneas sistemáticamente convertidas en dobletes (y no en tripletes) que se separaban proporcionalmente a la intensidad del campo magnético al observarlas perpendicularmente a éste:

> "... y la investigación teórica es incapaz de dar cuenta de la duplicación que se ha observado en la casi totalidad de los casos examinados hasta ahora."

No obstante, un análisis actual del artículo de Michelson no permite entender sus resultados contando sólamente con la parca explicación del dispositivo experimental que proporciona el autor. En efecto, si bien es cierto que la línea D_1 del sodio es un cuadruplete que bien podría observarse como un doblete si la resolución no era suficiente, bajo ningún concepto éste podría haber sido el caso de la D_2, sextuplete que se observaría como triplete en las mismas condiciones, ni el de la línea "roja" del cadmio (a 6438.470 Å), que es un triplete puro. Sólo se pueden concebir dos razones para tal observación: la primera es un error en la interpretación de las curvas de visibilidad del interferómetro

–que, por demasiado grande, el autor del presente trabajo tiende a descartar–; la segunda es que, aunque omitido en el texto, el dispositivo contara con un analizador de polarización que tan sólo transmitía luz linealmente polarizada en una dirección perpendicular al campo magnético. Esta segunda parece ser la más plausible, habida cuenta de que en un artículo posterior [35], ya en 1898, muestra un esquema de un nuevo experimento en el que se incluye un analizador. En este artículo, Michelson ya encuentra diferentes patrones Zeeman, que él divide en tres tipos tan sólo y clasifica correctamente (atendiendo a su resolución espectral) tanto el doblete D como las líneas "azul", "verde"[19] y "roja" del cadmio.

Tanto en la comunicación citada, como en su artículo de comienzos de 1898, [43], Preston identifica correctamente los patrones Zeeman de las líneas D del sodio y encuentra diferentes tipos en otras líneas tras una observación fotográfica –que se reproduce en el ejemplar de *Philosophical Magazine* a que corresponde este último artículo (Plate XXIII)–. En un esquema gráfico resume los cinco tipos de patrones Zeeman que observa: tripletes, cuadrupletes "debilitados en el centro"[20], dobletes, cuadrupletes o "dobles dobletes" y sextupletes. La diversidad de multiplicidad observada en las diferentes líneas fue rápidamente confirmada y aumentada por los experimentos de diferentes autores ese mismo año como Cornu [4], Becquerel y Deslandres [2], y Ames, Earhart y Reese [1]. Las pruebas experimentales, pues, obligaban a una reformulación de la teoría, incapaz de explicarlas. Podemos citar como ejemplo el artículo de Lorentz[21] [33] en el que al final dicho autor expresa:

> "Sin embargo, tengo algunos escrúpulos para adoptar esta visión del caso, porque pienso que todavía no es completamente cierto que las vibraciones que producen la luz puedan ser descritas por ecuaciones de la forma (1)."

A partir de entonces, comenzó a acuñarse el término de efecto Zeeman "normal" para designar el mostrado por los tripletes –esto es, los patrones explicados por la teoría de Lorentz– y el de efecto Zeeman "anómalo" para el resto. La importancia del artículo de Preston, sin embargo, no sólo radica en que supuso el punto de partida del desacuerdo entre teoría y observación, sino que en él se sugiere la proporcionalidad del desdoblamiento de las componentes con el cuadrado de la longitud de onda central de la línea, $\delta\lambda \propto \lambda^2$, ley de amplia

[19] La línea azul se encuentra a 4799.915 Å y la verde a 5085.824 Å. La primera es un sextuplete y la segunda un multiplete de nueve componentes.

[20] Por cuadrupletes "debilitados en el centro" entiende este autor aquel patrón en que las componentes centrales poseen menor intensidad que las más separadas de la posición original. Como tal clasifica la línea azul del cadmio, clasificación que resulta lógica si atendemos a su resolución espacial. Las líneas D del sodio las distingue perfectamente como cuadruplete y sextuplete, respectivamente.

[21] Este artículo es una reproducción de una comunicación de Lorentz a la academia holandesa, del 25 de junio de 1898.

utilidad, incluso hoy en día, en las aplicaciones astrofísicas. De hecho, Preston no era consciente de los problemas que sus experimentos planteaban a la teoría, porque suponía que originalmente las líneas espectrales podían no ser simples y tener una constitución interna que, si bien no resuelta en ausencia de campo magnético, explicaran la diversidad de multiplicidades observada:

> "Desde un punto de vista teórico, sin embargo, no encontramos razón alguna para exigir que todas, o ni siquiera alguna de, las líneas espectrales deban resolverse en tripletes bien definidos cuando se observan a través de las líneas magnéticas de fuerza. Porque, para que una línea espectral exhiba un triplete característico bajo la influencia del campo magnético, es necesario que la libertad de vibración [los grados de libertad] sea igual en todas las direcciones y, en este caso, que la intensidad de cada componente rectangular sea la misma."

Basándose pues en la teoría de Lorentz, propone la ley del cuadrado de la longitud de onda, que no llegaría a verificar experimentalmente hasta el año siguiente [44].

4.1. Observaciones solares

Mientras que el descubrimiento en el laboratorio había venido precedido por no pocos intentos previos fallidos, esto es, la intuición acerca del fenómeno "estaba en el ambiente", en el caso del descubrimiento astronómico el caso parece ser el contrario. A pesar de que el ensanchamiento y/o desdoblamiento de las líneas espectrales en las manchas era repetidamente observado, la explicación correcta no parece haber sido intuida con anterioridad a Hale[22]. La razón hay que encontrarla, sin duda, en el enorme número de incógnitas por resolver. Valga como muestra la última frase del artículo de Cortie [8] en 1903:

> "El espectro de una mancha es un fenómeno muy complejo en el cual el cambio en los ensanchamientos relativos [por comparación al espectro fotosférico] de las líneas es de poca importancia cuando se le compara con la constancia de hechos más característicos."

La publicación de Rowland en los primeros números de *The Astrophysical Journal* (1895-1897) de su *Tabla preliminar de longitudes de onda del espectro solar* suscita el interés de los espectroscopistas solares que, rápidamente, se

---

[22] El autor de este artículo debe reconocer que la búsqueda realizada entre la bibliografía de 1895 a 1908 ha sido exhaustiva tan sólo en la de lengua inglesa: fundamentalmente, *The Astrophysical Journal* y *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* y las referencias en ellas citadas. Este hecho puede ser motivo para una ulterior investigación de fuentes bibliográficas en otras lenguas. Sin embargo, existen al menos dos razones por las que creemos en la completitud de la búsqueda. Por un lado, la correspondencia fluida entre distintos investigadores era práctica común, como hemos podido incluso comprobar en este mismo artículo, y el francés y el alemán eran idiomas generalmente conocidos por la intelectualidad de la época. Por otra parte, desde su fundación, *The Astrophysical Journal* sirvió de plataforma para que investigadores de lengua no inglesa difundieran en inglés reproducciones de sus comunicaciones a las distintas academias nacionales. No en vano, en el periodo citado, encontramos en esta revista, por ejemplo, artículos de autores como Lorentz, Zeeman, Runge, Paschen, etc.

dedican a encontrar regularidades, similitudes y diferencias en el espectro de las manchas comparándolo con el de la fotosfera. Obviamente, una de las cuestiones de mayor interés era la identificación de líneas características de las manchas, por si pudieran existir distintos elementos químicos en éstas que en el resto del Sol. Cortie emprende un estudio sistemático [6, 7, 8] en el que uno de sus parámetros estimados es el ensanchamiento relativo de las líneas. Sin embargo, en este parámetro incluye medidas de líneas que son prácticamente inexistentes en la fotosfera –de hecho es en las que más se fija– y le impide llegar a alguna conclusión relevante tal y como muestra la cita del párrafo anterior. No obstante, es posible encontrar menciones en sus trabajos al desdoblamiento [8]:

> "A partir de estas observaciones, parece que los fenómenos dominantes en el espectro de las manchas se pueden clasificar como sigue: –Ensanchamiento de líneas, ..., inversión de líneas, ..."

pero la "inversión" la confunde con la inversión que tiene lugar en líneas cromosféricas (ya conocidas). Fowler, en 1905, informa de observaciones similares a las de Cortie [13], pero en las que incluye la "intensidad" de las líneas como parámetro medible y concluye que las sugerencias de Cortie acerca de una especial preponderancia de ciertos elementos en las manchas no tiene por qué tener lugar.

Una de las preocupaciones evidentes era la determinación de la temperatura de las manchas. Al menos, una estimación de si eran más calientes o más frías que el resto de la fotosfera. En una comunicación a la Royal Society, en 1904, Lockyer[23], argumenta:

> "Es decir, la caída de temperatura experimentada por los vapores metálicos al pasar de la fotosfera al núcleo de la mancha es del mismo orden que aquél en que la atmósfera absorbente está obligada al pasar de las condiciones de temperatura de Capella o el Sol a las de Arturo o estrellas de menor temperatura."

La discusión era realmente intensa en la época. Como ejemplo citaremos el trabajo de Wilson [51] en el que ¡produce en el laboratorio el espectro de una "mancha artificial"! y concluye que las manchas deben ser más calientes que la fotosfera.

Entre 1904 y 1906, Mitchell, del Observatorio de Princeton, publica tres artículos [36, 37, 38] acerca del espectro de las manchas solares, basados en sus observaciones visuales de diferentes manchas. Estudia un total de 680 líneas haciendo particular énfasis en las "inversiones" que mostraban algunas de ellas. En el segundo de los trabajos ilustra gráficamente (Placa II) los tipos

[23]Una de sus contribuciones a la Astrofísica fue la de ser uno de los pioneros en el establecimiento de escalas de temperatura para las estrellas atendiendo a las características de su espectro –véase la obra de Hearnshaw [22, p. 90-93].

de líneas observadas. Ahí distingue claramente entre las inversiones conocidas de las líneas cromosféricas y las que él atribuye a efectos puramente debidos a la mancha solar; por fin, esboza una explicación de estos últimos:

> "Los vapores [constituyentes de la mancha] situados abajo en la fotosfera y, consiguientemente, bajo mayor presión y temperatura, darían lugar (siendo inexistente el fondo brillante de la fotosfera) a un espectro de emisión; esto, junto a las capas más frías y menos densas de arriba, produciría una línea oscura con un centro brillante, es decir, una línea invertida."

En el último de los trabajos citados, tras una ligera mejora del dispositivo experimental, ya distingue "inversiones dobles", esto es, tripletes, sobre todo en zonas penumbrales, lo cual hoy sabemos corresponde a la mayor inclinación del campo magnético penumbral que el umbral con respecto a la normal a la superficie solar.

Independientemente, Hale había emprendido a finales del XIX en su observatorio de Kenwood, en Chicago, la observación fotográfica sistemática del espectro de las manchas solares. Convencido de la ventaja que ofrecen las nuevas tecnologías e instrumentos para la comprensión experimental de los distintos fenómenos físicos, el trabajo lo continúa en el Observatorio de Yerkes y, finalmente, junto a su grupo, en el de Mt. Wilson. Esta convicción queda bien resumida en las tres razones que arguye en defensa de la observación fotográfica en 1906 [18]:

> "1. La posibilidad de grabar, durante periodos de buena definición [de la imagen], el espectro entero de varias manchas, relegando a placer el trabajo de medida e identificación de las líneas.
>
> 2. El alto grado de precisión alcanzable en medidas sobre fotografías, asegurando la correcta identificación de las líneas y la detección de pequeños desplazamientos causados por movimientos de presión.
>
> 3. La comodidad para poner al corriente a otros observadores, mediante la publicación de fotografías, de la naturaleza exacta de los resultados obtenidos, reduciendo así el peligro de malos entendidos que son tan comunes al trabajo visual."

En realidad, Hale no es el primero en realizar espectros fotográficos, pero como comprobamos aquí, sí se le puede considerar un buen adalid de los mismos. En espera de un espectrógrafo mejor, en el trabajo citado arriba incluso prescinde de la máxima resolución alcanzable a fin de emplear tiempos razonables de observación. Ello impide que, en su catálogo de líneas "afectadas"[24] en las manchas, pudiera distinguir ensanchamientos –excepto algunos más notables– y, no digamos ya, desdoblamientos. La interpretación física de las peculiaridades encontradas se publica ese mismo año y el siguiente en sendos artículos [20, 19], los cuales muestran por sí mismos otra –y

[24]El hecho observacional diferencial más claro de las manchas eran aquellas líneas que se mostraban distintas que en la fotosfera. El esfuerzo de los investigadores, por consiguiente, volvía recurrentemente sobre ellas.

diríamos que fundamental de las formidables características de este investigador como astrofísico experimental: el uso de espectroscopía de laboratorio para comprender las observaciones solares. Persuadidos de que el principal factor determinante de las diferencias espectrales entre la mancha y el resto de la superficie era la temperatura, Hale, Adams y Gale, emprenden el estudio comparativo con espectros de chispa y de arco voltaico de más de 300 líneas de diversos elementos, de forma que establecen claramente una relación entre aumento de temperatura y debilitamiento y viceversa, de donde concluyen que

> "No estamos todavía preparados para expresar una opinión final, pero estamos inclinados a pensar que las diferencias de temperatura son adecuadas para dar cuenta de los fenómenos de arriba [anteriormente mencionados]."

Resolver convincentemente el dilema de la temperatura de las manchas, el cual había implicado a no pocos investigadores con anterioridad, era encontrar solución al quizá principal enigma de la Física Solar de la última parte del siglo XIX y, por tanto, podemos conjeturar que ello le permitió plantearse nuevos problemas observacionales como los que le condujeron al descubrimiento de campos magnéticos en el Sol. Resulta tentador, sin embargo, destacar también su fortuito uso de espectros de relativamente baja resolución, dado su empeño en utilizar la fotografía. No haber encontrado desdoblamientos ni ensanchamientos notables de líneas espectrales en sus placas, le evitó, no cabe duda, tener que dar explicación en base a la temperatura (lo cual habría sido evidentemente imposible) a tales rasgos característicos de las manchas.

5. El descubrimiento en el Sol

En febrero de 1908, Hale comunica, en la descripción del nuevo telescopio solar instalado en una torre de Mt. Wilson, la observación fotográfica de desdoblamientos de las líneas:

> "Las fotografías no sólo enseñan muchas líneas nuevas en las manchas; algunas muestran por primera vez inversiones similares a las observadas visualmente por Mitchell [ver §4.1]. Dado que dichas inversiones pueden resultar de gran importancia para la interpretación de los espectros de las manchas, recibirán [a partir de ahora] una atención cuidadosa."

No obstante, la dedicación observacional de Hale y su grupo no se ceñía a la espectroscopía. Desde su invento, el espectroheliógrafo había sido sucesivamente mejorado y sistemáticamente utilizado tanto en Kenwood, Yerkes o Mt. Wilson, obteniendo buenas colecciones de imágenes solares en las líneas H y K del calcio, así como en las del hidrógeno H_β, H_γ y H_δ. Hasta 1907, sin embargo, no había sido posible la obtención de placas en longitudes de onda tan rojas como las de la línea H_α. Tan pronto como ese mismo año se encontró un método para sensibilizar placas en el rojo, emprendió la observación

sistemática de esa línea. La riqueza de detalles que ofrecía H_α, hasta entonces desconocidos, focalizó su interés en la misma e, influido[25] por las viejas teorías del XIX acerca de las manchas –en las que repetidamente se proponen vórtices, torbellinos o ciclones para explicar su naturaleza–, se convence de haber encontrado indicaciones observacionales de la existencia de vórtices en las manchas [16]. Realmente, los prejuicios basados en tales teorías antiguas debieron ser los verdaderos excitadores de su intuición científica, porque en las fotografías que aparecen publicadas en el artículo de junio de 1908 citado resulta cuando menos difícil adivinar algún sesgo morfológico de la presencia de tales torbellinos. Hoy en día sabemos que tales movimientos ciclónicos no están en absoluto asociados a las manchas, pero su pretendido descubrimiento de los mismos disparó nuevamente su intuición y, ya al final del mencionado artículo, sugiere la posible presencia de campos magnéticos. El hilo conductor de su razonamiento intuitivo es un bello ejemplo de resolución de un "rompecabezas" científico, a pesar de que alguna de las "piezas" era errónea:

"Sin entrar por el momento en mayores detalles, se puede ofrecer quizás una sugerencia simple relacionada con la posible existencia de campos magnéticos en el Sol. Sabemos por las investigaciones de Rowland que la revolución rápida de cuerpos eléctricamente cargados produce un campo magnético cuyas líneas de fuerza se encuentran a ángulos rectos con el plano de revolución. Algunos corpúsculos[26] emitidos por la fotosfera se pueden quizá dirigir a los vórtices[27], o una preponderancia de iones positivos o negativos puede resultar por alguna otra causa. En los espectros de manchas con el telescopio de torre y el espectrógrafo de 30 pies, se han fotografiado recientemente líneas dobles, las cuales parecen inversiones, confirmando las observaciones visuales de Young y Mitchell. Debe determinarse si las componentes de estas líneas dobles están circularmente polarizadas en direcciones opuestas, o, si no, si otras indicaciones menos obvias de un campo magnético están presentes. Intentaré las observaciones necesarias tan pronto como una mancha adecuada aparezca en el Sol."

Su intuición no tardó sino un mes en ser verificada. En julio del mismo año comunica a la Astronomical Society of the Pacific [15] los primeros resultados positivos. Había comenzado los trabajos el 24 de junio y la comunicación está fechada el 3 de julio. Utiliza como analizador de polarización un romboedro de Fresnel y un prisma de Nicol. La rotación del prisma permitía identificar claramente las diferentes polarizaciones de ambas componentes. En su verificación de la fiabilidad de sus observaciones utiliza, entre otros argumentos, líneas telúricas que no se ven afectadas por las distintas manipulaciones del analizador. En fin, concluye:

"Hasta donde sé, el único medio para transformar una línea sencilla en un doblete, cuyas componentes están polarizadas circularmente en sentidos opuestos, es un intenso campo

[25] Él mismo lo reconoce en [16].

[26] Término utilizado por J.J. Thomson para referirse a los electrones.

[27] Aquí hace referencia al trabajo de J.J. Thomson "Conducción de electricidad a través de los gases".

magnético. Aparece probable, por tanto, que una mancha contenga tal campo, el cual da lugar a dobletes y a líneas ensanchadas en el espectro de la mancha."

Emocionado por su hallazgo, su intuición se desborda y rápidamente sugiere la posible conexión del campo magnético con las tormentas magnéticas que tienen lugar en la atmósfera terrestre, así como la posibilidad de la existencia de grandes manchas en estrellas rojas, susceptibles de mostrar el efecto Zeeman.

Este artículo, titulado *Vórtices solares y el efecto Zeeman*, fue enviado por el autor a la revista *Nature* junto a dos placas fotográficas comprendiendo la región espectral entre 6250 y 6360 Å. Simultáneamente, lo envió al propio Zeeman en carta fechada el 6 de julio, para que éste emitiera su opinión acerca de los resultados. En el ejemplar de 20 de agosto de 1908 (vol. 78, p. 368) de *Nature* aparece una reseña de tal artículo junto a una fotografía del espectro de una mancha que muestra la bien conocida (por los físicos solares actuales) pareja de líneas de hierro a 6301.5 y 6302.5 Å. Seguida a esta reseña, se encuentra una carta de Zeeman [57] comentando el hallazgo de Hale. De su entusiasmo da debida cuenta el párrafo final:

"Confío, sin embargo, no haber sido demasiado apasionado escribiendo esta revisión del espléndido descubrimiento del Prof. Hale. Su importancia para la física general y solar debe ser muy grande, y no menos para las teorías de la meteorología y el magnetismo terrestre, proporcionando, como lo hace, una *vera causa* para las perturbaciones del equilibrio eléctrico y magnético de nuestra Tierra y su atmósfera."

En octubre de 1908, Hale publica un nuevo artículo ([17]) en el que, a pesar de su modesto título, *Sobre la posible existencia de un campo magnético en manchas*, suministra pruebas más que concluyentes de la presencia de campos magnéticos que, incluso, determina cuantitativamente. Comienza este trabajo por hacer una discusión acerca de la polarización instrumental que, aún hoy en día es a veces olvidada por algunos observadores. Continúa por encontrar distintas polaridades en el campo de manchas del mismo grupo[28]. Pero lo que, sin duda, es más importante, emprende un trabajo de laboratorio paralelo destinado a medir la intensidad del campo en las manchas por comparación. A pesar de que los resultados no son todo lo buenos que Hale deseaba, hoy en día, considerando los medios disponibles a su alcance, podemos considerarlos excelentes. Utilizando gran cantidad de líneas de distintos elementos, encuentra valores de la intensidad de campo en el rango de 2600 a 2900 G, valores muy de acuerdo con los medidos actualmente. En una apreciable demostración de modestia, el artículo concluye resaltando los problemas que su autor encontraba para la completa comprensión del problema, lejos

[28]Él se refiere a vórtices con sentido contrario de revolución.

de enfatizar la importancia de sus resultados positivos –costumbre ésta tan al uso en nuestros días–. Enaltece, pues, este trabajo la figura de su autor, quizá el más grande físico solar del siglo XX.

Agradecimientos

La única mención a la observación de Lockyer que el autor conoce, en el dominio de la Física Solar actual (digamos que en los últimos 30 años), se encuentra en el artículo de J. Harvey [21] de 1986. Su lectura supuso el estímulo para emprender la investigación que se describe en el presente trabajo. El autor quiere reconocer el ánimo proporcionado por J. Harvey y el suministro por su parte de algunas fuentes bibliográficas. El interés mostrado y las ayudas recibidas de E. Landi Degl'Innocenti y B. Ruiz Cobo en la correción del manuscrito merecen igualmente el más sincero agradecimiento.

Bibliografía

[1] J.S. Ames, R.F. Earhart, and H.M. Reese. *ApJ*, 8:48, 1898.

[2] Becquerel and Deslandres. *Comptes Rendus*, 4 de abril, p. 997, 1898.

[3] A. Cornu. *Comptes Rendus*, 125:555, 1897.

[4] A. Cornu. *Comptes Rendus*, 126:181, 1898.

[5] A.L. Cortie. *MNRAS*, 47:19, 1886.

[6] A.L. Cortie. *MNRAS*, 58:370, 1898.

[7] A.L. Cortie. *MNRAS*, 62:516, 1902.

[8] A.L. Cortie. *MNRAS*, 468:63, 1903.

[9] P.A.M. Dirac. *Proc. Roy. Soc. London (A)*. 117:610, 1928.

[10] M. Faraday. *Experimental researches in electricity*. Quaritch, London, 1839-1855. Vol. 3.

[11] Ch. Fievez. *Bull. de l'Académie de Belgique*, 9(3):381, 1885.

[12] Ch. Fievez. *Bull. de l'Académie de Belgique*, 12(3):25, 1886.

[13] A. Fowler. *MNRAS*, 65:205, 1905.

[14] J. von Fraunhofer. *Ann. d. Phys.*, 56:264, 1817.

[15] G.E. Hale. *P.A.S.P.*, 20:220, 1908.

[16] G.E. Hale. *ApJ*, 28:100, 1908.

[17] G.E. Hale. *ApJ*, 28:315, 1908.

[18] G.E. Hale and W.S. Adams. *ApJ*, 23:11, 1906.

[19] G.E. Hale and W.S. Adams. *ApJ*, 25:75, 1907.

[20] G.E. Hale, W.S. Adams, and G. Gale. *ApJ*, 24:185, 1906.

[21] J. Harvey En *Small scale magnetic flux concentrations in the solar photosphere*. W. Deinzer, M. Knölker y H.H. Voigt (eds.). Vandenhoeck & Ruprecht, Götingen, 1986

[22] J.B. Hearnshaw. *The analysis of starlight*. Cambridge University Press, Cambridge, 1986.

[23] M. Jammer. *The conceptual development of Quantum Mechanics*. Tomash Publishers, American Institute of Physics, 1989. The History of Modern Physics, 1800-1950, Vol. 12.

[24] Dr. Bence Jones. *The life and letters of Faraday*. Longman, Green & Co., Londres, 1870. vol. 2, p. 444.

[25] G. Kirchoff. *Poggendorf's Ann.*, 109:275, 1860. El artículo fue previamente publicado en *Monatsberichte Berliner Akad*, p. 783, 1859.

[26] G. Kirchoff and R. Bunsen. *Poggendorf's Ann.*, 110:160, 1860. Ver también *Phil. Mag.*, 20:89, 1961.

[27] C.G.W. König. *Wiedmannsche Ann. d. Phys.*, 62:240, 1897.

[28] R. de L. Kronig. *Nature*, 117:264, 1926.

[29] A. Landé. *Zeitschrift für Physik, 5:231, 1921.*

[30] A. Landé. *Zeitschrift für Physik, 15:189. 1923.*

[31] J.N. Lockyer. *Proc. Roy. Soc.*, 15:256, 1866.

[32] H.A. Lorentz. *Archives Néerl.*, 25:363, 1892.

[33] H.A. Lorentz. *ApJ*, 9:37, 1899.

[34] A.A. Michelson. *ApJ*, 6:48, 1897.

[35] A.A. Michelson. *ApJ*, 7:131, 1898.

[36] M. Mitchell. *ApJ*, 19:357, 1904.

[37] M. Mitchell. *ApJ*, 22:4, 1905.

[38] M. Mitchell. *ApJ*, 24:78, 1906.

[39] C.E. Moore. *A multiplet table of astrophysical interest*, NBS Tech. Note 36, 1959.

[40] W. Pauli. *Die Naturwissenschaften*, 12:741, 1924.

[41] W. Pauli. *Zeitschrift für Physik*, 43:601, 1927.

[42] T. Preston. *Sc. Trans. Roy. Dub. Soc.*, 6:385, 1897.

[43] T. Preston. *Phil. Mag.*, 45:325, 1898.

[44] T. Preston. *Nature*, 59:248, 1899.

[45] B. Stewart. *Proc. R. Soc.*, 10:385, 1860.

[46] P.G. Tait. *Proc. R. Soc. Edinburgh*, 6:118, 1875.

[47] J.J. Thomson. *Philosophical Magazine*, 44:298, 1897.

[48] W. Thomson (Lord Kelvin). *Camb. and Dub. Math. J.*, 2:61, 1847.

[49] G.E. Uhlenbeck and S. Goudsmit. *Die Naturwissenschaften*, 13:953, 1925.

[50] E. Whittaker. *A history of the theories of aether & electricity. 1st Vol.* Dover Pub., Inc., 1989.

[51] W.E. Wilson. *MNRAS*, 65:224, 1905.

[52] C.A. Young. *Nature*, 7, 12 de diciembre, 1872.

[53] C.A. Young. *The Sun*. D. Appleton and Co., New York. 1883. 2nd Edition.

[54] P. Zeeman. En *Verslag van Gewone Vergaderingen der Wis-en Natuur-kundige Afdeeling*, p. 181, 242, 1896.

[55] P. Zeeman. *Phil. Mag.*, 43:226, 1897

[56] P. Zeeman. *ApJ*, 5:332, 1897.

[57] P. Zeeman. *Nature*, 78:369, 1908.